

УДК 621.357

**ИЗНОСОСТОЙКИЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ ТРОЙНОГО СПЛАВА Pb - Sn - Sb***канд. хим. наук, доц. О.Г. ПУРОВСКАЯ, канд. хим. наук, доц. Л.И. СТЕПАНОВА**(Научно-исследовательский институт физико-химических проблем  
Белорусского государственного университета, Минск),**В.П. КАЗАЧЕНКО**(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель),**М.А. ЛЕВАНЦЕВИЧ**(Институт механики и надежности машин НАН Беларуси, Минск),**М.В. ПОДОСЕТНИКОВ**(ОАО «Полоцкий завод «Проммаширемонт», Полоцк)*

*Исследовано влияние содержания сурьмы в осажденных из борфтористоводородного электролита сплавах Pb - Sn на состав, структуру и триботехнические свойства. Показано, что как при трении без смазки, так и в условиях граничной смазки сплавы, содержащие сурьму, превосходят по износостойкости свинцово-оловянные.*

**Введение.** Ускоренное развитие техники невозможно без широкого внедрения новых технологий, в том числе и электрохимических процессов осаждения сплавов, прочно вошедших в практику для нанесения коррозионно-стойких, защитно-декоративных и функциональных покрытий. При осаждении сплавов во многих случаях экономятся благородные и цветные металлы, повышаются микротвердость и износостойкость покрытий, снижается расход электроэнергии и т.д. Метод гальванического осаждения позволяет получать покрытия определенного состава с заданными функциональными свойствами, регулировать в широких пределах скорость их осаждения и микроструктуру за счет варьирования состава электролита и условий проведения процесса, наносить покрытия одновременно на большое количество деталей.

Широкое распространение в промышленности нашли антифрикционные сплавы на основе свинца. Низкий коэффициент трения этого металла (0,05...0,06), высокая коррозионная стойкость в различных средах позволяют использовать покрытия на его основе для нанесения на различные узлы трения, в том числе на специальные подшипники качения и скольжения. Применение чистого свинца ограничено из-за сравнительно низкой температуры плавления, растворимости в маслах, многих органических кислотах, а также токсичности его соединений. В то же время легирование свинца другими металлами (например, оловом) придает покрытиям новые свойства. При содержании олова в количестве 5...25 % они могут применяться как антифрикционные. Дополнительное введение в свинцово-оловянные сплавы небольших количеств третьего компонента (чаще всего сурьмы или меди) позволяет улучшить свойства и расширить области их применения. Покрытия такими тройными сплавами обеспечивают хорошую прирабатываемость, большую износостойкость и стойкость против эрозии. В работе [1] представлены результаты исследования по разработке состава борфтористоводородного электролита для осаждения сплава Pb - Sn - Sb, обладающего антифрикционными свойствами.

**Цель исследования** - изучение влияния концентрации соли сурьмы в электролите на содержание компонентов, микроструктуру и триботехнические параметры осаждаемых из борфтористоводородного электролита тройных сплавов Pb - Sn - Sb.

**Методика эксперимента.** Сплавы Pb - Sn - Sb осаждались из борфтористоводородного электролита, содержащего соли восстанавливаемых металлов, борфтористоводородную и борную кислоты, желатину и резорцин [1, 2]. Процесс осаждения проводился при комнатной температуре, плотности тока 4 А/дм<sup>2</sup> и перемешивании электролита. В качестве анода использовался сплав Pb - Sn с содержанием олова 6...8 мас. %. Скорость осаждения в указанных условиях составляла 1,3... 1,5 мкм/мин. В качестве подложки использовалась специально подготовленная (обезжиривание, травление) медная фольга толщиной 100 мкм.

Определение состава сплавов проводили методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием спектрометра ПРМ-1 РМ при относительной средней квадратичной погрешности измерений не более 2 %.

Исследование микрорельефа поверхности электрохимически сформированных сплавов проводили с помощью электронного микроскопа просвечивающего типа ЭМВ-100 при использовании для препарирования метода угольных реплик.

Микрофотографии поверхности образцов после триботехнических испытаний выполнялись при помощи металлографического микроскопа МИМ-7, оснащенного видеоконтрольным устройством, сопряженным с компьютером. Профиль дорожки трения исследовался профилометром «Калибр», подключенным к компьютеру через аналогово-цифровое устройство.

Износостойкость покрытий определяли с использованием стандартной машины трения СМТ-1 по схеме ролик - частичный вкладыш в условиях граничной смазки моторным маслом при нагрузке до 3 МПа и скорости до 0,9 м/с или на машине трения торцевого типа при трении с ограниченной смазкой (масло М10В). Триботехнические свойства покрытий оценивались также и в режиме трения без смазки на микротрибометре ММТ по схеме шар - плоскость при возвратно-поступательном движении со скоростью  $3,4 \cdot 10^{-2}$  м/с шарового индентора диаметром 6 мм и нагрузке 150 г. Микротвердость образцов исследовали с помощью твердомера ПМТ-3 при нагрузке 50 г.

Результаты и их обсуждение. Концентрацию соли сурьмы в электролите варьировали в пределах от 9,5 до 23,5 г/л при постоянных концентрациях остальных компонентов (содержание солей свинца и олова составляло 185 и 75 г/л соответственно). В табл. 1 приведены составы сплавов при разных концентрациях соли сурьмы в электролите. Из представленных данных видно, что содержание свинца в сплавах практически постоянно, содержание олова с ростом концентрации соли сурьмы в электролите падает с 14 до 10 мас. %, а содержание сурьмы при этом возрастает с 2 до 7 мас. %.

Таблица 1

Влияние концентрации соли сурьмы в электролите на состав сплавов

№ раствора	Концентрация $Sb(BF_4)_3$ , г/л	Содержание в сплаве, мас. %		
		свинец	олово	сурьма
1	-	85	15	-
2	9,5	84	14	2
3	14,2	84	12	4
4	18,8	83	11	6
5	23,5	83	10	7

Исследование морфологии поверхности сплавов при разном содержании в них сурьмы (рис. 1) показывает, что с возрастанием концентрации последней поверхность покрытий выравнивается, размер зерна уменьшается. Такое изменение морфологии поверхности должно сказаться и на триботехнических свойствах покрытий.

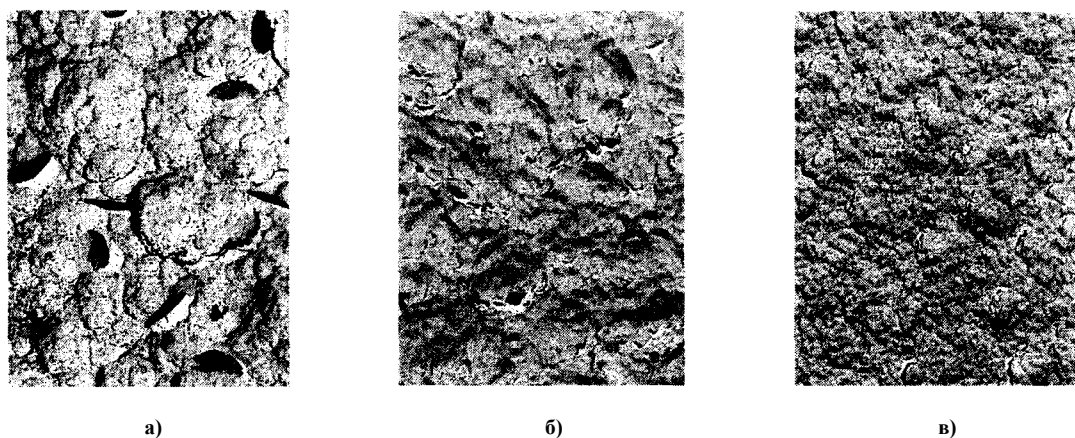


Рис. 1. Морфология поверхности сплавов Pb - Sn - Sb, осажденных из растворов: а - 1; б - 2; в - 4 (а -  $\times 10^4$ ; б, в -  $\times 210^4$ )

В табл. 2 приведены данные триботехнических испытаний на машине трения СМТ-1 при граничной смазке, из которых видно, что минимальные интенсивность изнашивания и коэффициент трения наблюдаются для сплавов, содержащих 4...6 мас. % сурьмы.

Таблица 2

Результаты триботехнических испытаний покрытий Pb - Sn и Pb Sn -Sb при граничной смазке

№ раствора (табл. 1) / содержание сурьмы, мас. %	Коэффициент трения	Температура контртела, °C	Микротвердость, Н <sup>56</sup> , МПа		Массовая интенсивность изнашивания, I <sub>м</sub> , кг·10 <sup>-9</sup> /м
			до испытаний	после испытаний	
1/0	0,025	26	77	82	1,48
2/2	0,018	33	91	92	1,08
3/4	0,012	34	103	101	0,7
4/6	0,012	26	85	104	0,9
5/7	0,038	35	81	113	1,05

На рис. 2 представлены графики зависимости коэффициента трения от параметра  $P \cdot v$  ( $P$  - нагрузка,  $v$  - скорость трения).

Как видно из графика, коэффициент трения не зависит от указанного параметра в широких пределах изменения скорости и нагрузки.

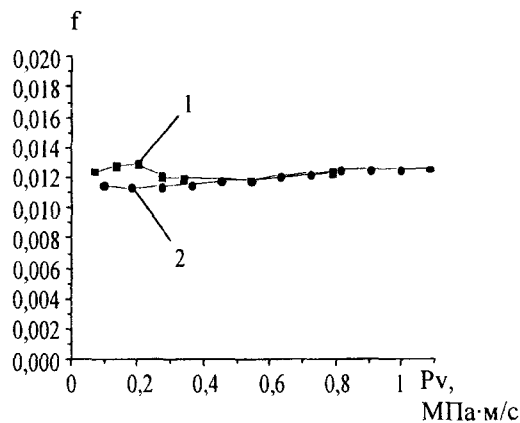


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения покрытия Sn – Pb – Sb от параметра  $Pv$  для покрытия с содержанием сурьмы 4 мас. %:

1 – постоянная скорость (0,45 м/с), нагрузка 0...3 МПа;

2 – постоянная нагрузка (2 МПа), скорость в пределах 0,1...0,9 м/с

Испытание образца сплава с содержанием сурьмы 6 мас. % на трение и износ на машине торцевого типа при ступенчатом нагружении от 1 до 2,5 МПа (после приработки в течение 60... 150 мин под нагрузкой 1 МПа) показало, что коэффициент трения покрытий на всех этапах испытаний составлял 0,01 ...0,04, температура стального контртела колебалась в пределах 31 ...54 °С, суммарный износ диска с покрытием не превышал 11,7... 13,810<sup>13</sup> г/ч.

Наряду с исследованием закономерностей износа изучаемых сплавов в разных условиях в присутствии смазки исследовался и процесс сухого трения этих покрытий на микротрибometре ММТ.

В табл. 3 приведены режимы и результаты таких испытаний.

Таблица 3

Результаты триботехнических испытаний гальванически осажденных сплавов Pb - Sn и Pb - Sn - Sb (при нагрузке 150 г и длине дорожки трения 13 мм)

№ раствора (табл. 1) / / содержание сурьмы, мас. %	Путь трения, $L_{TP}$ , м	Глубина дорожки трения, $H$ , мкм	Удельная глубина дорожки трения, $H_{vd}$ , мкм/м	Число циклов
1/0	3,25	26	8	250
2/2	15,03	20	1,33	1156
4/6	5,85	13	2,22	450
5/7	5,20	21	4,04	400

За критерий износостойкости принималась удельная глубина дорожки трения  $H_{vd} = H/L_{Tfs}$ , мкм/м ( $H$  - глубина дорожки трения, мкм;  $L_{TP}$  - путь трения, м). В свою очередь,  $L_{TP} = IN$ , м ( $l$  - длина дорожки трения;  $N$  - число фреттинг-циклов).

Из приведенных данных видно, что минимальным износом при сухом трении обладает покрытие, содержащее 2 мас. % сурьмы (его износ в шесть раз меньше, чем у двойного сплава). При возрастании содержания сурьмы до 6 мас. % его износостойкость снижается в 1,7 раза, а до 7 мас. % - в три раза в сравнении с образцом, содержащим 2 мас. % Sb.

Коэффициент трения без смазки выходит на установившийся режим при различном числе циклов. Наибольшее число циклов трения до схватывания ( $N = 359$ ) выдерживает сплав, содержащий 6 мас. % сурьмы, тогда как не содержащий сурьму сплав выдерживает только 52 цикла. Установлено, что коэффициент трения без смазки покрытий Pb - Sn - Sb при установившемся режиме практически не зависит от содержания сурьмы и составляет  $1,15 \pm 0,005$ .

На микроснимках (рис. 3) дорожек трения после проведения испытаний отчетливо видны образовавшиеся в процессе трения глубокие впадины (темные участки на снимках). Контртело (стальной шарик) после эксперимента покрыто хорошо связанными с его поверхностью частицами покрытия.

Таким образом, можно предположить, что основным механизмом изнашивания покрытия в процессе трения без смазки является микросхватывание и образование слоев переноса.

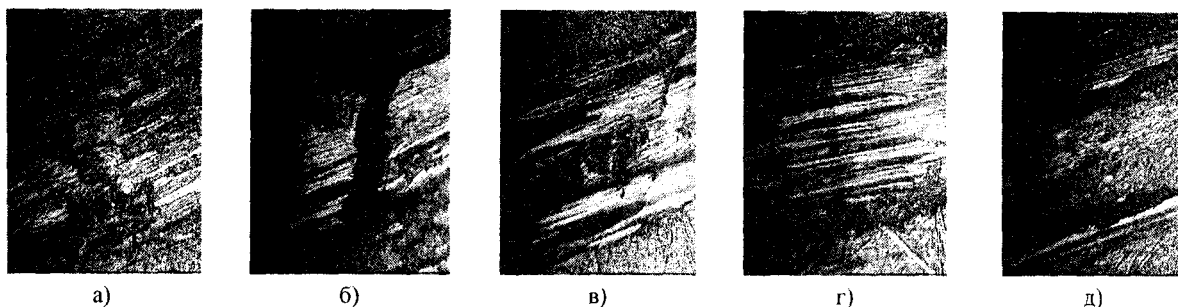


Рис. 3. Микроснимки дорожек трения покрытий Pb – Sn (а) и Pb – Sn – Sb (б – д) после испытаний в режиме сухого трения (содержание сурьмы: б – 2; в – 4, г – 6; д – 7 мас. %)

Сравнивая между собой микроснимки дорожек трения покрытий Pb - Sn и Pb - Sn - Sb (4 мас. % Sb), испытывавшихся при одинаковом числе фреттинг-циклов ( $N = 250$ ) и одинаковой нагрузке, можно прийти к выводу, что содержащий сурьму сплав изнашивается более равномерно, что подтверждается и профилограммами дорожек трения этих покрытий (рис. 4).

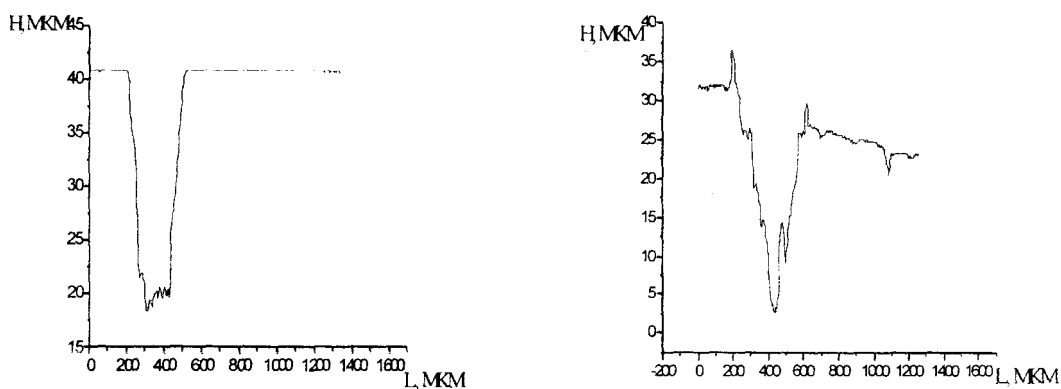


Рис. 4. Профилограммы дорожек трения покрытий Pb - Sn (справа) и Pb - Sn - Sb (слева)

**Выводы.** Исследовано влияние содержания сурьмы в гальванически осажденных из борфтористоводородных электролитов сплавах Pb - Sn - Sb на морфологию поверхности и триботехнические свойства полученных покрытий. Показано, что включение сурьмы в сплавы Pb - Sn приводит к выравниванию их поверхности и снижению размера зерна. Установлено, что при трении в условиях граничной смазки содержащие небольшое (до 4...6 мас. %) количество сурьмы покрытия характеризуются износостойкостью, превосходящей износостойкость двойных сплавов Pb - Sn в 1,5...2,0 раза, и более низким коэффициентом трения, величина которого практически не зависит от параметра  $Pv$  при изменении его значения от 0,09 до 1 МПа м/с. В условиях трения без смазки при оптимальном содержании сурьмы (2 мас. %) износ тройного сплава примерно в шесть раз меньше, чем у образца двойного сплава. Содержащий 6 мас. % Sb сплав выдерживает примерно в семь раз больше циклов нагрузки до схватывания, чем сплав без сурьмы, и изнашивается более равномерно.

Совокупность триботехнических параметров, а также результатов производственных испытаний, показавших, что тройной сплав Pb - Sn - Sb удовлетворяет требованиям, предъявляемым к антифрикционному слою вкладышей подшипников, позволяет рекомендовать такие сплавы для восстановления вкладышей подшипников различных типов, а также для изготовления и ремонта других деталей, работающих в условиях трения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Степанова Л.И., Пуровская О.Г., Мозолева Т.В. Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр. - Мн.: Технопринт, 2001. - С. 409 - 413.
2. Степанова Л.И., Пуровская О.Г. // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении: Материалы междунар. науч.-техн. конф. - Мн.: Технопринт, 2002. - С. 251 - 256.